

На правах рукописи



ШИШКИН Евгений Игоревич

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ
МИКРО- И НАНОДОМЕННЫХ СТРУКТУР В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ
В НИОБАТЕ ЛИТИЯ И ТАНТАЛАТЕ ЛИТИЯ

01.04.07. – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург – 2002

Работа выполнена в отделе оптоэлектроники и полупроводниковой техники НИИ физики и прикладной математики Уральского государственного университета им. А.М. Горького.

Научный руководитель –

доктор физико-математических наук, профессор
В.Я. Шур

Официальные оппоненты –

доктор физико-математических наук, профессор
Б.А. Струков

доктор физико-математических наук, профессор
Б.Н. Филиппов

Ведущее учреждение –

Институт проблем машиноведения РАН

Защита состоится « 10 » октября 2002 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.286.01 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора физико-математических наук в Уральском государственном университете им. А.М. Горького (620083, г. Екатеринбург, К-83, пр. Ленина 51, комн. 248).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Уральского государственного университета им. А.М. Горького.

Автореферат разослан « 9 » сентября 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
с.н.с.



Н.В. Кудреватых

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Процесс переключения поляризации в сегнетоэлектриках под действием внешнего электрического поля может быть рассмотрен как пример фазового перехода первого рода [1]. Исследование эволюции доменной структуры сегнетоэлектриков во внешнем электрическом поле является удобным экспериментальным методом изучения общих закономерностей кинетики фазовых превращений, что, несомненно, является важной фундаментальной проблемой современной физики конденсированного состояния. Ниобат лития и танталат лития являются прекрасными модельными объектами для таких исследований, поскольку относятся к классу одноосных сегнетоэлектриков и обладают сравнительно простой доменной структурой, которая может быть визуализирована оптическими методами. Вместе с тем, эти материалы долгое время считались "замороженными сегнетоэлектриками" благодаря высокому коэрцитивному полю [2], поэтому кинетика доменной структуры в этих материалах изучена крайне слабо.

Интерес к этим материалам сильно возрос в последнее время благодаря развитию новой отрасли прикладной науки – доменной инженерии (domain engineering), которая занимается разработкой методов создания в сегнетоэлектрических кристаллах доменных структур с определенной геометрией для применения в различного рода устройствах [3]. Одной из наиболее важных задач доменной инженерии является создание периодических доменных структур в нелинейно-оптических материалах (фотонных кристаллов) для построения эффективных преобразователей частоты когерентного излучения [4,5]. Ниобат лития и танталат лития являются перспективными материалами для этого применения [4]. Приложение электрического поля с помощью периодических электродов является на сегодняшний день наиболее популярным методом создания периодических доменных структур [5]. Однако, недостаточная информация о кинетике доменной структуры в этих материалах часто приводит к неоптимальному подбору технологических параметров и потере эффективности устройств. Таким образом, актуальность работы обусловлена необходимостью детального исследования кинетики доменной структуры в перспективных для применения материалах с целью оптимизации методов доменной инженерии для создания фотонных кристаллов. Особенно важными с этой точки зрения являются исследования особенностей формирования микро- и нанодоменных структур, так как актуальные для применения периоды структур составляют от долей микрона до нескольких микрон. Вместе с тем, исследование формирования таких объектов, как микро- и нанодомены, и разработка методов их наблюдения является важной фундаментальной проблемой современной физики сегнетоэлектриков.

Целью работы являлось развитие физических представлений о кинетике доменной структуры в ниобате лития и танталате лития при переключении поляризации под действием внешнего электрического поля. Для реализации поставленной цели были решены следующие задачи:

- Детально исследовать отдельные стадии эволюции доменной структуры во внешнем электрическом поле в ниобате лития и танталате лития конгруэнтного и стехиометрического составов, а также в ниобате лития, легиро-

ванном магнием.

- Изучить особенности эволюции доменной структуры при переключении поляризации с использованием полосовых периодических электродов на примере конгруэнтного ниобата лития.
- Исследовать механизм коррелированного зародышеобразования и его потенциальные возможности для создания периодических доменных структур.
- Провести исследования особенностей формирования упорядоченных микро- и нанодоменных структур при переключении сегнетоэлектриков с искусственным диэлектрическим слоем.

Объекты исследования. В качестве исследуемых материалов использовались монокристаллы ниобата лития LiNbO_3 (LN) и танталата лития LiTaO_3 (LT). Эти классические нелинейно-оптические материалы обычно выращиваются конгруэнтного состава (CLN и CLT). Однако известно, что эти кристаллы имеют отклонение от стехиометрии около 2% и, как следствие, большую дефектность [6]. По-видимому, этим обусловлено высокое коэрцитивное поле 210 кВ/см, величина которого почти на два порядка превышает коэрцитивное поле типичных сегнетоэлектриков, что затрудняет исследование процесса переключения в этих материалах. Кроме того, оказалось, что материалы конгруэнтного состава имеют сравнительно низкий порог оптического повреждения и значительное поглощение, что ограничивает возможность их применения. В последние годы специально для нелинейно-оптических применений были усовершенствованы методы выращивания кристаллов с составом, близким к стехиометрическому (SLN и SLT), а также ниобата лития, легированного магнием (LN:Mg). В результате был повышен порог оптического повреждения и смещен край зоны поглощения в ультрафиолетовую область. Наиболее интересным является тот факт, что в этих материалах почти на порядок уменьшилось коэрцитивное поле, что значительно облегчило создание периодических доменных структур и эксперименты по переключению [6]. Однако исследования кинетики доменной структуры находятся пока на самом начальном этапе. В работе исследовались все перечисленные выше материалы: CLN, SLN, LN:Mg, CLT и SLT.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Впервые показано, что аномальная кинетика доменной структуры в конгруэнтном танталате лития (большая плотность зародышей и треугольная форма доменов) может быть отнесена за счет запаздывания объемного экранирования. Представлен ряд экспериментальных фактов, подтверждающих эту гипотезу.
- Впервые проведено детальное исследование кинетики доменной структуры в ниобате лития и танталате лития конгруэнтного состава – материалах, которые долгое время считались "замороженными сегнетоэлектриками" благодаря высокому коэрцитивному полю.
- Впервые показано, что увеличение плотности зародышеобразования в результате циклического переключения конгруэнтного танталата лития и

ниобата лития, легированного магнием, а также после рентгеновского облучения стехиометрического танталата лития обусловлено существованием микровключений неполярной фазы.

- Детально исследован эффект самопроизвольного обратного переключения под действием внутреннего поля смещения. С помощью оригинальной методики измерено изменение этого поля после переключения из исходного заэкранированного состояния. Определены характерные времена релаксации, соответствующие различным механизмам объемного экранирования.
- Впервые обнаружен эффект умножения пространственной частоты доменной структуры по сравнению с пространственной частотой электродов при самопроизвольном обратном переключении.
- Впервые при прямом и обратном переключении обнаружено самоорганизованное формирование квазипериодических микро- и нанодоменных структур и исследованы механизмы их формирования. Показано, что образование этих структур обусловлено механизмом коррелированного зародышеобразования.

Практическая ценность Практическая значимость работы определяется возможностью использования разработанных методов контроля и управления доменной структурой для улучшения параметров периодических доменных структур для устройств акустоэлектроники и нелинейной оптики. Основной идеей этих применений является создание в материале периодической доменной структуры для выполнения условия квази-фазового синхронизма, обеспечивающего эффективность работы таких устройств [3-5]. Ниобат лития и танталат лития являются одними из наиболее перспективных материалов для эффективной генерации и преобразования частоты акустического и оптического излучения с использованием периодических доменных структур.

На защиту выносятся:

1. Объяснение полученных экспериментальных результатов в рамках единого подхода к эволюции доменной структуры, основанного на рассмотрении процесса переключения поляризации в сегнетоэлектриках, как фазового перехода первого рода, движущей силой которого является локальное электрическое поле, определяющее вероятность термостимулированного зародышеобразования.
2. Результаты детального исследования отдельных стадий эволюции доменной структуры (зародышеобразования, прямого прорастания, бокового роста и коалесценции) во внешнем электрическом поле в ниобате лития и танталате лития различных составов.
3. Зависимость внутреннего поля смещения от времени после переключения поляризации из исходного заэкранированного состояния и его роль при самопроизвольном обратном переключении.
4. Особенности кинетики доменной структуры конгруэнтного ниобата лития при переключении поляризации с помощью полосовых периодических

электродов. Сценарии эволюции доменной структуры при самопроизвольном обратном переключении после выключения внешнего поля.

5. Механизм коррелированного зародышеобразования и его роль в самоорганизованном формировании квазипериодических микро- и нанодоменных структур при переключении сегнетоэлектриков с искусственным диэлектрическим слоем.

Апробация работы. Основные результаты диссертации были представлены на 33 Всероссийских и Международных конференциях, в том числе на 7^{ом} и 8^{ом} Международных семинарах по физике сегнетоэлектриков-полупроводников (1996, 1998, Ростов-на-Дону), Materials Research Society Fall Meetings (MRSFM: 1997, 2000, 2001, Boston, USA), Materials Research Society Spring Meeting (MRSSM 1998, San Francisco, USA), International Conference on Electroceramics and their Applications (1998, Montreux, Switzerland), 6th, 7th Japan-CIS/Baltic Symposiums on Ferroelectricity (1998, Tokyo, Japan; 2002, Санкт-Петербург), 11th, 12th International Symposiums on Applications of Ferroelectrics (ISAF: 1998, Montreux, Switzerland; 2000, Honolulu, Hawaii), 5th, 6th, 7th International Symposiums on Ferroic Domains and Mesoscopic Structures (ISFD: 1998, State College, USA; 2000, Nanjing, China; 2002, Peninsula of Giens, France), CNOM Annual Affiliates Meeting (1999, Stanford, USA), 9th European Meeting on Ferroelectricity (EMF 1999, Praha, Czech Republic), 15^{ой} Всероссийской конференции по физике сегнетоэлектриков (1999, Ростов-на-Дону), 2^{ом} и 3^{ем} Всероссийских семинарах "Нелинейные процессы и проблемы самоорганизации в современном материаловедении" (1999, 2000, Воронеж), 11th, 12th, 13th International Symposiums on Integrated Ferroelectrics (ISIF: 1999, Colorado Springs, USA; 2000 Aachen, Germany; 2001, Colorado Springs, USA), 3^{ем} Международном семинаре по физике сегнетоэластиков (2000, Воронеж), 7th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials (2000, Newport Beach, USA), 3^{ем} Международном семинаре по релаксорным сегнетоэлектрикам (2000, Дубна), 5th, 6th European Conferences on the Application of Polar Dielectrics (2000, Jurmala, Latvia; 2002, Aveiro-Portugal), 1th International Meeting on Ferroelectric Random Access Memories (2001, Gotemba, Japan), 10th International Meeting on Ferroelectricity (IMF 2001, Madrid, Spain), Школе-семинаре "Актуальные проблемы неорганического материаловедения" (2001, Дубна), International Workshop on Periodic Microstructured Nonlinear Optical Materials (2001, Madrid, Spain), International Joint Conference on the Applications of Ferroelectrics (2002, Nara, Japan) и Международной школе-семинаре "Нелинейные процессы в дизайне материалов" (2002, Воронеж).

Публикации и личный вклад автора. Основные результаты исследований были опубликованы в 98 печатных работах, из них 21 статья во всероссийских и зарубежных реферируемых печатных изданиях. Диссертационная работа была выполнена в лаборатории сегнетоэлектриков отдела оптоэлектроники и полупроводниковой техники НИИ ФПМ Уральского государственного университета им. А.М. Горького в рамках исследований, проводимых по государственной научной программе № 2.61.00 "Изучение эволюции микро- и нанодоменов в сегнетоэлектриках и релаксорах", при частичной поддержке грантов РФФИ № 96-02-19588 и №01-02-17443, Программ "Университеты России: Фундаментальные Ис-

следования" (гранты № 5563 и УР.06.01.031), "Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники. Электроника" (грант № 03-03-29), Американского фонда гражданских исследований и развития для независимых государств бывшего Советского Союза (грант № REC-005), а также стипендий Международного фонда Сороса (1997, 1998, 1999, 2000, 2001 гг.) и Правительства Российской Федерации (2000/01 и 2001/02 учебный год).

Представленные в работе результаты исследований кинетики доменной структуры в LN и LT были представлены Советом РАН по физике сегнетоэлектриков и диэлектриков для включения в список важнейших достижений РАН в 1999, 2000 и 2001 г. Стендовые доклады были признаны лучшими в своих секциях на: 1) ISFD'5, 1998, State College, USA; 2) ISFD'6, 2000, Nanjing, China; 3) 3^{em} Всероссийском семинаре "Нелинейные процессы и проблемы самоорганизации в современном материаловедении", 2000, Воронеж, 4) Школе-семинаре "Актуальные проблемы неорганического материаловедения", 2001, Дубна, 5) Международной школе-семинаре "Нелинейные процессы в дизайне материалов", 2002, Воронеж.

Все основные результаты работы были получены лично автором. Выбор направления исследований, обсуждение результатов и формулировка задач проводились совместно с научным руководителем профессором В.Я. Шуром и Е.Л. Румянцевым. Экспериментальные измерения в LN и LT проводились совместно с Е.В. Николаевой и В.Я. Шуром. Расчеты пространственного распределения электрического поля в системе с полосовыми периодическими электродами и периодической доменной структурой проводились при участии Д.В. Фурсова. Соавторы публикаций R.G. Batchko, G.D. Miller, R.K. Route, M.M. Fejer и R.L. Byer (Stanford University, USA) предоставили образцы CLN и CLT, а также оборудование для проведения экспериментов по переключению с полосовыми периодическими электродами, K. Terabe и K. Kitamura (NIMS, Japan) – образцы SLN и SLT.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, 4 приложений и списка цитируемой литературы. Общий объем работы составляет 237 страниц, включая 97 рисунков, 3 таблицы и библиографии из 289 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, освещается современное состояние проблемы, формулируются основные цели и задачи работы, кратко излагается содержание диссертации и основные научные положения, которые выносятся на защиту.

Первая глава является обзорной. В ней рассматриваются основные методы исследования процесса переключения поляризации в сегнетоэлектриках: способы визуализации доменной структуры (ДС) и измерения интегральных характеристик. Приводится обзор экспериментальных результатов исследования процессов переключения, выделяются основные стадии эволюции ДС во внешнем электрическом поле. Рассмотрено влияние ДС на диэлектрические, акустические и оптические свойства сегнетоэлектриков и принципы применения периодических

доменных структур (ПДС) в устройствах акустоэлектроники и нелинейной оптики. Представлен обзор современных методов создания ПДС, особое внимание уделено методу, использующему приложение неоднородного внешнего поля с помощью полосовых периодических электродов (ППЭ). Приводятся основные физические свойства исследуемых материалов.

Вторая глава является методической. В ней описана экспериментальная установка для комплексного исследования процессов переключения, приведены использованные методики эксперимента, способы визуализации ДС, а также основные параметры и способы подготовки исследуемых образцов.

Пластины CLN, LN:Mg и CLT толщиной 0.2-0.5 мм, вырезанные перпендикулярно полярной оси, были изготовлены фирмой Crystal Technology, CA, USA. Монокристаллы выращивались по методу Чохральского вытягиванием в направлении полярной оси. Пластины SLN и SLT толщиной 0.5-1 мм, вырезанные перпендикулярно полярной оси, были изготовлены фирмой Oxide Corporation, Kobuchisawa, Japan и Single Crystal Group, National Institute for Material Science, Tsukuba, Japan. Монокристаллы стехиометрических составов выращивались из расплава с повышенной концентрацией Li вытягиванием вдоль полярной оси модифицированным методом Чохральского с использованием двойного тигля. Полярные грани пластин шлифовали и полировали алмазными пастами. Переключение проводилось с двумя типами прозрачных электродов: жидкого электролита (водного раствора LiCl) и проводящего оксида $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$, наносимого методом ионно-плазменного распыления. При исследовании особенностей переключения с ППЭ на одну из полярных граней образца методом фотолитографии наносились металлические ППЭ, которые покрывались слоем диэлектрика (фоторезиста) для подавления переключения за пределами электродов (Рис. 1).

Эволюция ДС в LN и LT в процессе переключения наблюдалась при помощи поляризационного микроскопа в проходящем свете. Непосредственно при переключении одновременно регистрировались последовательность мгновенных доменных конфигураций и интегральные характеристики (ток и заряд переключения). Статическая ДС выявлялась селективным химическим травлением благодаря различию скоростей травления доменов разного знака [7]. Полученный поверхностный рельеф визуализировался при помощи оптического микроскопа, сканирующего электронного микроскопа (SEM) и сканирующего зондового микроскопа (SPM) в контактной атомно-силовой моде (AFM). В этой моде регистрировалось взаимодействие зонда с поверхностью образца за счет близкодействующей

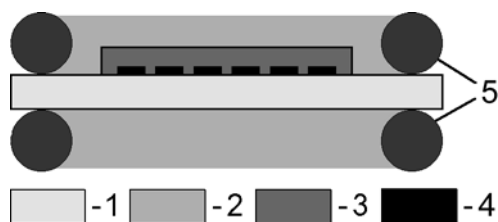


Рис. 1. Схема ячейки для создания ПДС при переключении с использованием ППЭ. 1 – образец, 2 – жидкий электролит (раствор LiCl), 3 – диэлектрик (фоторезист), 4 – металлические ППЭ, 5 – резиновые кольца. В фоторезисте имеются "окна" для обеспечения электрического контакта между электролитом и ППЭ.

щих сил Ван-дер-Ваальса, что позволяло измерять рельеф с нанометровым горизонтальным и субнанометровым вертикальным разрешением. Статические домены визуализировались и без травления при помощи поляризационного микроскопа и SPM в пьезоэлектрической моде (PRIM). Для реализации пьезомоды между проводящим зондом и нижним электродом прикладывалось переменное электрическое поле, что приводило к колебанию поверхности образца за счет пьезоэффекта. При сканировании регистрировался локальный пьезоотклик, амплитуда и фаза которого определяются величиной и знаком поляризации соответственно [8].

В третьей главе представлены результаты детального исследования эволюции ДС в LN и LT в однородном внешнем электрическом поле. Использование как локальных (прямая визуализация ДС), так и интегральных методов (измерение петель диэлектрического гистерезиса и токов переключения), позволило детально исследовать все основные стадии эволюции ДС в процессе переключения (зародышеобразование, "прямой" и боковой рост доменов, коалесценция) [1,7].

Было обнаружено, что процесс зародышеобразования существенно униполярен – образование новых доменов при приложении поля всегда происходит на одной из полярных поверхностей кристалла. При этом плотность зародышеобразования и пространственное распределение зародышей в CLT в исследуемом диапазоне внешних полей существенно отличаются от остальных исследованных материалов. Только в CLT наблюдается высокая плотность зародышей (порядка 1000 мм^{-2}), однородно распределенных по всей переключаемой площади (Рис. 2а). Во всех остальных материалах зародышеобразование происходит вдоль края электрода (Рис. 2б) под действием сильных краевых полей или на дефектах поверхности (Рис. 2в). При этом, количество зародышей, как правило, невелико и не превышает десятка на 1 мм электрода или дефекта (Рис. 2б,в). Было также обнаружено, что количество зародышей значительно увеличивается за счет образования остаточных доменов в результате многократного циклического переключения, либо рентгеновского облучения. В последнем случае включения несегнетоэлектрической фазы, образующейся в объеме под действием рентгеновского облучения, играют роль центров зародышеобразования.

Экспериментальное исследование прорастания доменов в полярном направлении (стадии "прямого" роста) с непосредственной визуализацией движения

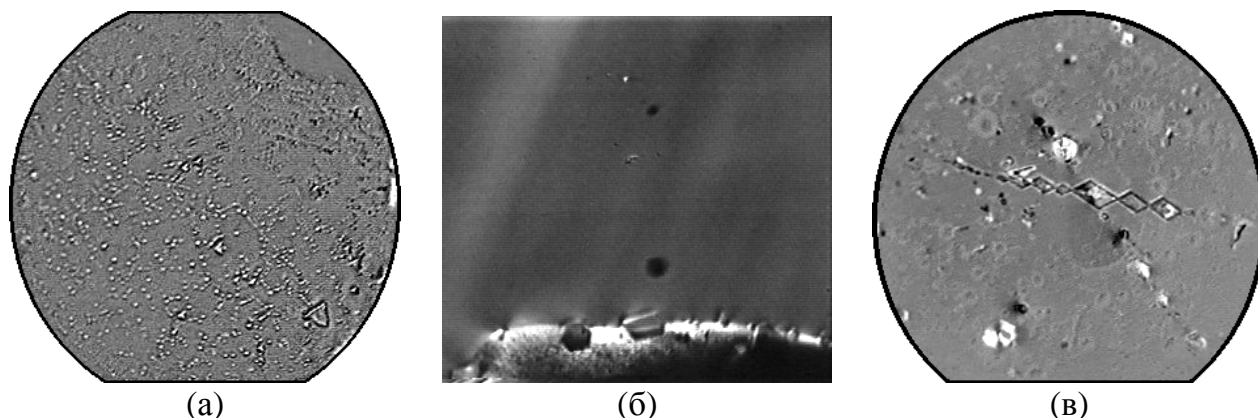


Рис. 2. Зародышеобразование: (а) в CLT, (б) в LN:Mg на границе электрода и (в) в CLN на дефекте поверхности (царапине). (а), (в) диаметр переключаемой области 1 мм, (б) высота изображения 1 мм. Жидкий электрод. Оптическая визуализация.

вершины иглообразного домена сопряжено с большими техническими трудностями и не проводилось. Однако, некоторые характеристики процесса удалось получить косвенными методами. На примере LN:Mg при визуализации доменов в процессе переключения было обнаружено, что на стадии прямого роста возникает яркое свечение на фоне темных областей, занятых сквозной ДС. Наблюдаемый эффект обусловлен локальным изменением коэффициента преломления, индуцированным электрическим полем заряженных доменных стенок, которые ограничивают несквозной домен на стадии его прямого прорастания. Измерение времени прямого прорастания с помощью этого эффекта позволило определить скорость полярного движения доменных стенок в полях, близких к пороговым, которая в LN:Mg составила примерно 5 мм/с в поле 70 кВ/см.

Боковой рост доменов после их прямого прорастания осуществляется за счет анизотропного движения доменных стенок, что приводит к формированию треугольников в CLT и шестиугольников во всех остальных материалах. Было показано, что во всех материалах боковой рост доменов связан с распространением вдоль стенок микроступеней. Основными центрами генерации ступеней являются углы доменов, пересечение доменных стенок с дефектами поверхности (царапинами). Наиболее эффективная генерация ступеней и самый быстрый рост происходят в результате коалесценции (слияния) доменов. При высокой плотности зародышеобразования в CLT движение стенок за счет генерации ступеней при слиянии и последующего роста ступеней вдоль стенок является преобладающим механизмом, а рост изолированных доменов практически не дает вклада в переключение (Рис. 3). В остальных материалах полное переключение может быть получено за счет роста одного домена. Однако, при многократном циклическом переключении рост количества зародышей (например, в LN:Mg), приводит к постепенному переходу к сценарию переключения, типичному для CLT.

Было обнаружено, что во всех материалах доменные стенки движутся немонотонно (скачкообразно) с тенденцией к сохранению ориентации доменных стенок. В CLT эти особенности выражены слабо, поскольку в переключении одновременно участвует большое количество доменов, что приводит к их непрерывному взаимодействию и слиянию (Рис. 3).

Прямая визуализация кинетики ДС предоставляет уникальную возможность непосредственно измерить полевую зависимость средней скорости бокового движения доменных стенок $v_s(E_{ex})$. На Рисунке 4 представлены результаты, полученные в CLN для переключения из исходного состояния (прямое переключе-

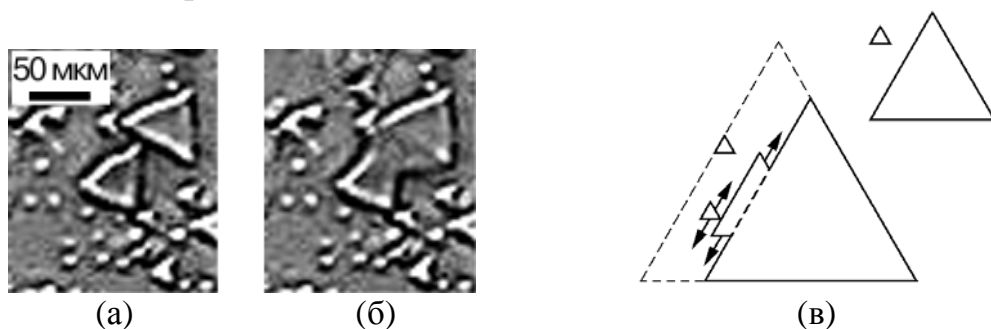


Рис. 3. Движение доменных стенок за счет слияния с доменами в CLT: (а) 0.7 с, (б) 0.8 с от момента включения поля. Жидкий электрод. Оптическая визуализация. (в) схема роста доменов.

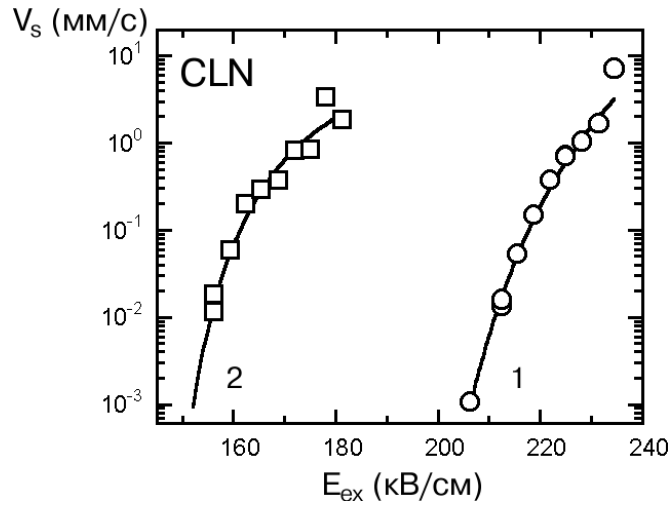


Рис. 4. Полевая зависимость средней скорости бокового движения доменных стенок при прямом – 1 и при обратном – 2 переключении в CLN. Экспериментальные точки аппроксимированы соотношением (1). Жидкий электрод.

ние) и в исходное состояние (обратное переключение). Экспериментальные точки были аппроксимированы экспоненциальной зависимостью, типичной для большинства сегнетоэлектриков:

$$v_s(E_{ex}) = v_{s\infty} \exp[-\delta E / (E_{ex} - E_{st})] \quad (1)$$

где E_{ex} – внешнее поле, δE – поле активации, E_{st} – поле старта, $v_{s\infty}$ – константа.

Как уже было отмечено, коалесценция доменов приводит к эффективной генерации ступеней на стенке и, тем самым, ускоряет процесс переключения (Рис. 3). Кроме того, при детальном исследовании кинетики ДС в CLN, SLN, LN:Mg и SLT, был обнаружен обратный эффект замедления движения сближающихся стенок. В некоторых случаях перед коалесценцией стенки практически полностью останавливались на расстоянии порядка микрона (Рис. 5). Этот эффект может быть объяснен существованием минимума в зависимости локального переключющего поля на стенке от расстояния между стенками. Проведенный расчет показал, что минимум соответствует сближению стенок на расстояние порядка толщины поверхностного диэлектрического зазора.

На графике полевой зависимости средней скорости бокового движения доменных стенок в CLN (Рис. 4) можно заметить различие полей старта при переключении в прямом и обратном направлениях. Эта особенность свидетельствует о

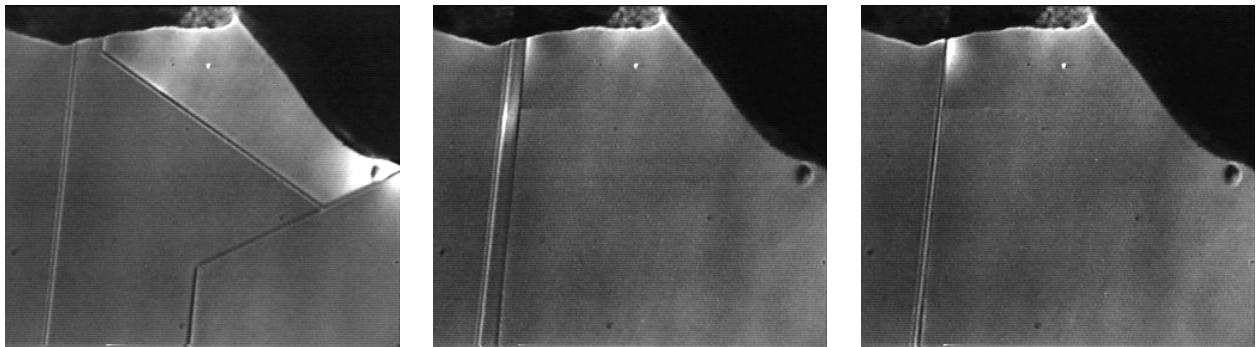


Рис. 5. Замедление стенок перед коалесценцией в LN:Mg. Размер изображения по вертикали 1 мм. Время между кадрами 3 с. $E_{ex} = 70$ кВ/см. Жидкий электрод. Оптическая визуализация.

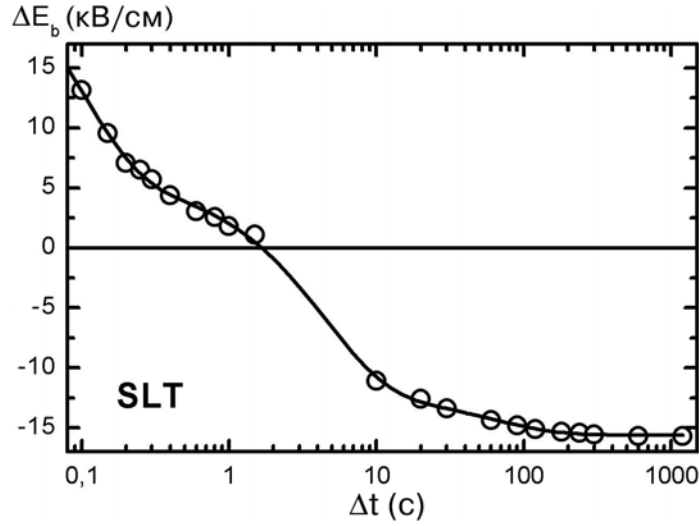


Рис. 6. Эволюция внутреннего поля смещения в SLT в результате переключения из исходного заэкранированного состояния. Данные в области малых Δt получены при самопроизвольном обратном переключении, а в области больших Δt – при обратном переключении во внешнем поле. Экспериментальные точки аппроксимированы зависимостью (4).

существовании внутреннего поля смещения E_b (bias field) [9]. В данном случае E_b составляет 19 кВ/см. Однако, величина поля E_b , действующего в образце, зависит от времени, которое образец находится в состоянии покоя между последовательными переключениями. Для приведенных результатов это время составляло порядка 30 с. В работе на примере SLT было проведено детальное измерение изменения E_b после переключения из исходного заэкранированного состояния (Рис. 6). Методика этого измерения заключается в определении порогового поля E_{st} , до которого через время Δt после переключения из исходного состояния необходимо уменьшить внешнее поле E_{ex} , чтобы произошло обратное переключение. Условие обратного переключения можно записать следующим образом:

$$E_{loc}(\Delta t) = E_{ex}(\Delta t) + E_{rd} + E_b(\Delta t) = E_{th} \quad (2)$$

где E_{loc} – локальное поле, являющееся суперпозицией внешнего поля E_{ex} , остаточного деполяризующего поля E_{rd} (деполяризующего поля, частично скомпенсированного внешним экранированием) и внутреннего поля смещения E_b .

Для возможности обратного переключения локальное поле должно достичь порогового значения E_{th} . Поскольку E_{rd} и E_{th} не зависят от Δt , то измерение зависимости $E_{st}(\Delta t)$ позволяет измерить изменение внутреннего поля смещения $\Delta E_b(\Delta t)$:

$$\Delta E_b(\Delta t) = E_b(\Delta t) + E_{rd} - E_{th} = E_b(\Delta t) + const = -E_{ex}(\Delta t) = -E_{st}(\Delta t) \quad (3)$$

Полученные данные $\Delta E_b(\Delta t)$ были аппроксимированы суммой трех экспоненциальных вкладов с характерными постоянными времени $\tau_{bf} = 90$ мс, $\tau_{bs} = 4.4$ с и $\tau_{bss} = 63$ с:

$$\Delta E_b(\Delta t) = \Delta E_b(0) + E_{\Delta f} \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_{bf}}\right) + E_{\Delta s} \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_{bs}}\right) + E_{\Delta ss} \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_{bss}}\right) \quad (4)$$

где ΔE_b – относительное изменение внутреннего поля смещения, τ_{bi} – времена объемного экранирования, $E_{\Delta i}$ – максимально возможное изменение внутреннего

поля смещения за счет конкретного механизма.

Различные вклады объяснены действием нескольких механизмов объемного экранирования, которые приводят к образованию и изменению внутреннего поля смещения.

Необходимо заметить, что пока внутреннее поле смещения не изменило знак, при выключении внешнего поля происходит самопроизвольное переключение под действием внутреннего поля смещения. Это явление может быть охарактеризовано относительной долей объема образца η , самопроизвольно переключившегося в исходное состояние после выключения внешнего поля. Эта величина может быть получена экспериментально, как отношение заряда, протекшего в цепи при обратном переключении Q_{bs} , к заряду прямого переключения Q_s :

$$\eta = Q_{bs} / Q_s \quad (5)$$

На Рисунке 7 представлена зависимость этой величины от времени между окончанием процесса переключения и моментом выключения внешнего поля для CLN. Видно, что ДС нестабильна в течение порядка 50 мс после переключения поляризации.

До сих пор предполагалось, что эволюция внутреннего поля смещения $E_b(\Delta t)$ происходит однородно во всей переключаемой области образца. Однако, было показано, что пространственно неоднородное изменение E_b может приводить к значительным изменениям в кинетике ДС. В частности, на основе этой идеи был предложен новый кинетический подход к описанию эффекта усталости в тонких сегнетоэлектрических пленках и керамике $Pb(Zr,Ti)O_3$.

Таким образом, детальное исследование кинетики ДС в LN и LT при переключении в однородном внешнем электрическом поле позволило получить ряд интересных результатов.

Четвертая глава посвящена изучению особенностей эволюции ДС при переключении с ППЭ на примере CLN. Были выявлены следующие стадии эволюции ДС при приложении внешнего электрического поля к ППЭ (Рис. 8). Переключение начинается с образования зародышей под краями металлических полосок (Рис. 8а), что обусловлено краевым эффектом – наличием максимумов сингулярного характера в распределении полярной компоненты внешнего поля вблизи

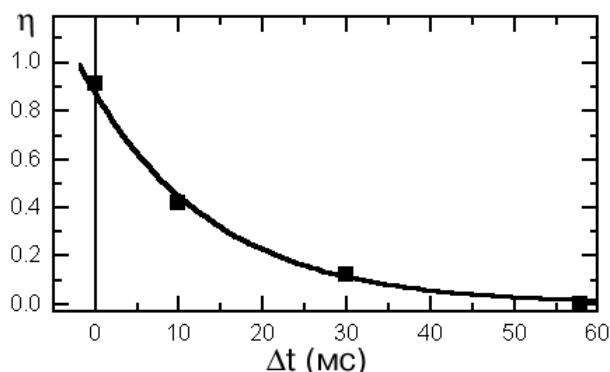


Рис. 7. Зависимость относительной доли объема образца, переключившейся в результате самопроизвольного обратного переключения, от времени выдержки образца во внешнем электрическом поле после окончания прямого переключения в CLN. Обработка экспериментальных результатов, полученных Майерсом [10].

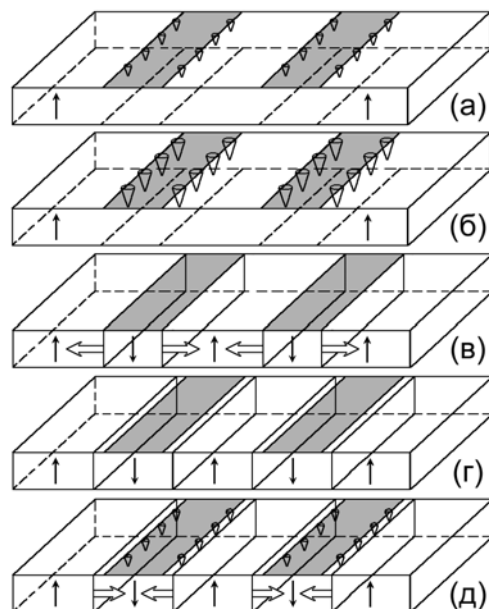


Рис. 8. Схема основных стадий эволюции ДС при переключении с ППЭ.

поверхности образца вдоль границ электродов. Далее происходит прямое прорастание клиновидных доменов через образец (Рис. 8б) и слияние изолированных доменов под электродами за счет бокового роста (Рис. 8в). В результате образуется полосовая ПДС, и процесс переключения продолжается за счет движения плоских доменных стенок за пределы электродов (Рис. 8в), которое может быть прекращено, если уменьшить внешнее электрическое поле (Рис. 8г). Выключение внешнего поля может приводить к самопроизвольному обратному переключению как под электродами, так и за их пределами (Рис. 8д).

Непосредственная визуализация ДС с достаточным разрешением при переключении с ППЭ пока не реализована, однако некоторая информация о кинетике ДС может быть получена из анализа результатов интегральных измерений. В частности, математическая обработка тока переключения позволила получить такие важные параметры кинетики ДС, как скорость прямого прорастания и скорость бокового роста изолированных доменов под краями электродов. Численные значения этих параметров при переключении во внешнем поле 220 кВ/см составили $v_d \approx 380$ мм/с и $v_s \approx 0.5$ мм/с соответственно. Таким образом, скорость прямого прорастания более чем на два порядка превышает скорость бокового роста.

Наиболее интересные результаты были получены при переключении в режиме ограничения по току, когда разность потенциалов на обкладках образца, определяющая среднее внешнее поле в образце, автоматически подстраивается таким образом (Рис 9а), что ток переключения не превышает определенной величины (Рис. 9б). Анализ временной зависимости поля, прикладываемого к образцу на стадии движения доменных стенок за пределы электродов (Рис. 8в), показал, что до 80% деполяризующего поля, создаваемого "шлейфом" нескомпенсированного связанного заряда, образующегося за движущимися доменными стенками, экранируется механизмами, отличными от внешнего экранирования и объемной проводимости. В качестве альтернативных механизмов были предложены: инжекция заряда через искусственный диэлектрический слой и поверхностная проводимость. Обработка спадающей части тока переключения (Рис. 9б) позволила получить зависимость скорости бокового движения доменных стенок за пределы элект-

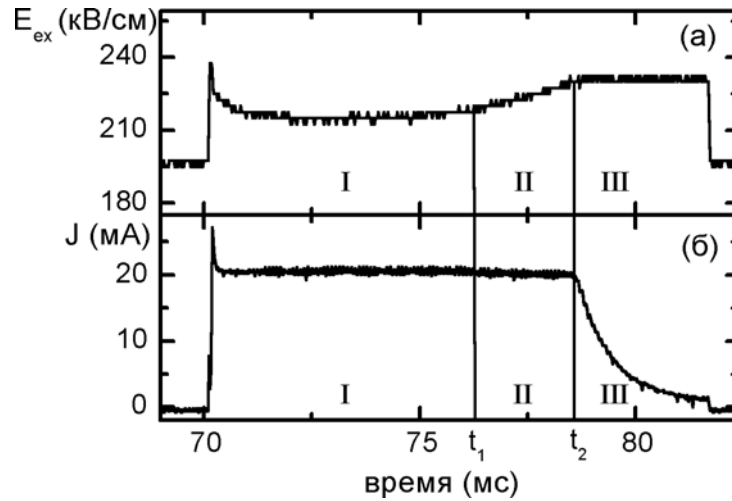


Рис. 9. Зависимость (а) среднего внешнего поля в образце и (б) тока переключения от времени при переключении CLN с ППЭ в режиме ограничения по току.

тродов от величины локального электрического поля E_{loc} (Рис. 10). Была получена линейная полевая зависимость и определены ее основные параметры – подвижность стенок $\mu = 0.34 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{Вс}$ и пороговое поле $E_{th} = 214 \text{ кВ/см}$:

$$v_s(E_{loc}) = \mu(E_{loc} - E_{th}) \quad (6)$$

Как уже было показано, ДС CLN нестабильна в течение 50 мс после окончания процесса переключения, что приводит к самопроизвольному обратному переключению после выключения поля (Рис. 7). Были выявлены два основных сценария эволюции ДС при самопроизвольном обратном переключении в образце с полосовой ПДС в зависимости от длительности переключающих импульсов.

В случае коротких импульсов поля обратное переключение происходит преимущественно за пределами электродов за счет обратного движения плоских доменных стенок, сформировавшихся в процессе прямого переключения. В некоторых случаях наблюдается более сложный процесс с качественным изменением формы доменной границы, сопровождающийся формированием и распространением фронта, представляющего собой квазипериодическую структуру своеобразных доменных пальцев (Рис. 11).

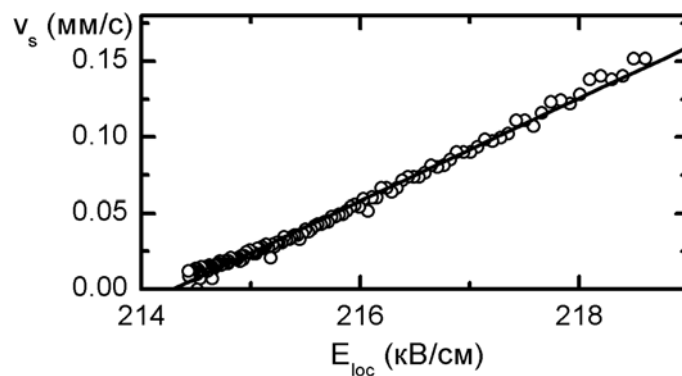


Рис. 10. Полевая зависимость скорости бокового движения доменных стенок в CLN, полученная из анализа тока переключения. Экспериментальные точки аппроксимированы зависимостью (6).

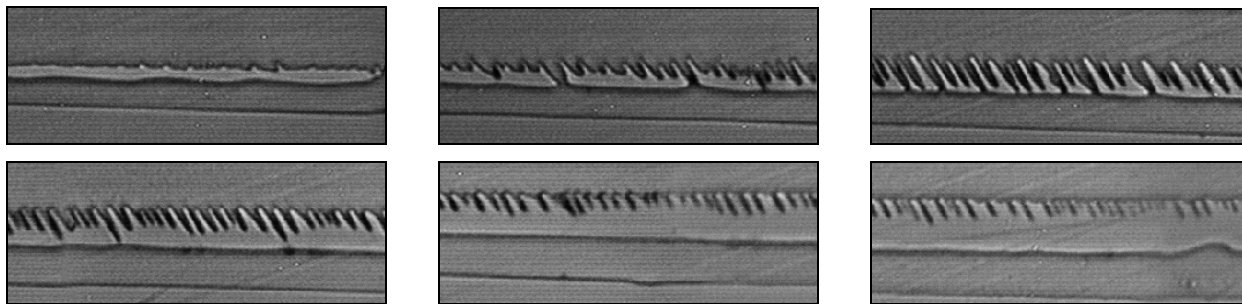


Рис. 11. Особенности движения доменных стенок при самопроизвольном обратном переключении в CLN с ППЭ. Оптическая визуализация рельефа травления на наклонных сечениях. Разные стадии соответствуют различной глубине сечения.

При более длинных импульсах переключающего поля обратное переключение происходит преимущественно под электродами и всегда начинается с образования зародышей под краями электродов (Рис. 12). При анализе их пространственного распределения была обнаружена четко выраженная корреляция в расстоянии между соседними зародышами. Для ДС, представленной на Рисунке 12, среднее расстояние составило 0.9 мкм , что соответствует линейной плотности вдоль края электродов 1100 мм^{-1} . Было показано, что клиновидные домены, образующиеся при обратном переключении, существенно несквозные и их глубина, как правило, не превышает 100 мкм .

Следующей стадией обратного переключения под электродами является слияние изолированных доменов, при котором наблюдается эффект умножения пространственной частоты ДС по отношению к пространственной частоте электродов (Рис. 13). Если обратное переключение заканчивается после слияния доменов только под краями электродов (Рис. 13а,б), то наблюдается утроение пространственной частоты ДС. Если обратное переключение под электродами происходит полностью (Рис. 13в,г), то наблюдается удвоение частоты. Наиболее интересный результат был получен, когда вместо движения доменных стенок, сформировавшихся при обратном переключении под краями электродов, наблюдалось образование новых цепочек доменов на некотором расстоянии от края электрода за его пределами (Рис. 13д). В этом случае происходит пятикратное увеличение пространственной частоты ДС. Таким образом, здесь наблюдается проявление эффекта коррелированного зародышеобразования, когда появление зародышей происходит на фиксированном расстоянии от существующих доменных стенок.

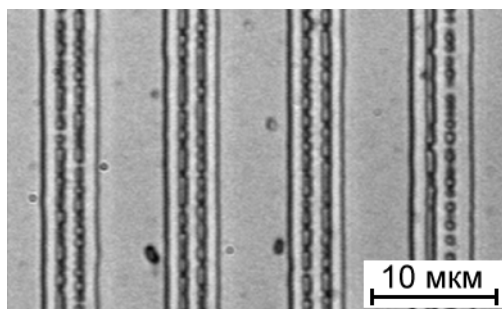


Рис. 12. Коррелированное зародышеобразование под краями электродов при самопроизвольном обратном переключении в CLN с ППЭ. Оптическая визуализация рельефа травления.

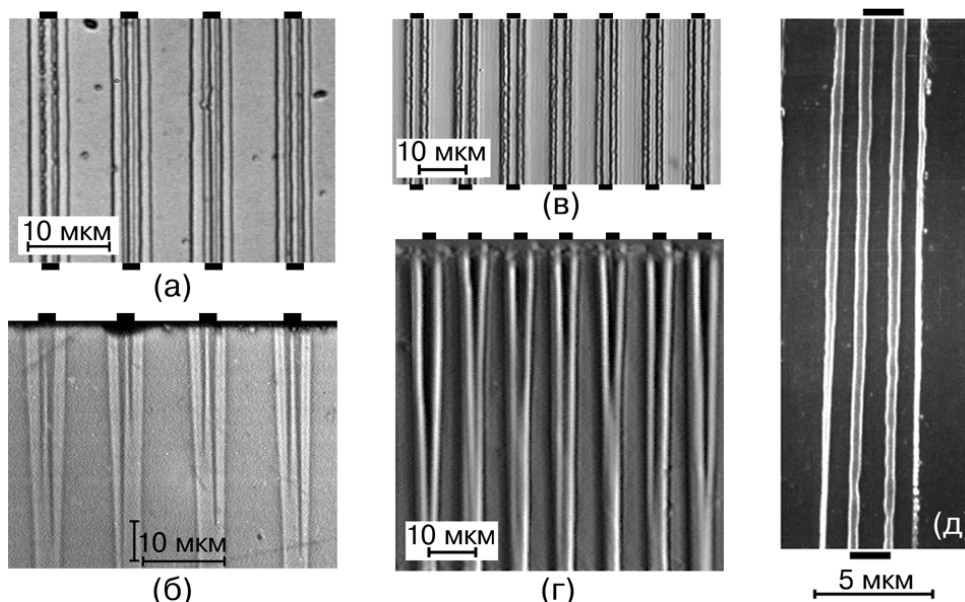


Рис. 13. Умножение пространственной частоты ДС по отношению к пространственной частоте ППЭ в CLN. Утроение частоты: (а) z^+ поверхность и (б) y сечение. Удвоение частоты: (в) z^+ поверхность и (г) y сечение. Пятикратное умножение частоты: (д) z^+ поверхность. Оптическая визуализация (а), (б), (в) рельефа травления и (г) скола; (д) визуализация рельефа травления с помощью SEM.

Для объяснения механизма коррелированного зародышеобразования был проведен расчет пространственного распределения локального поля вблизи плоской доменной стенки (Рис. 14). Оказалось, что вблизи поверхности образца в распределении поля наблюдается локальный максимум на расстоянии порядка толщины поверхностного диэлектрического зазора, который объясняет наблюдаемый эффект коррелированного зародышеобразования. Расстояние между первичными и вторичными доменными полосками, возникающими при наблюдении эффекта пятикратного увеличения пространственной частоты ДС (Рис. 13д), совпадает с толщиной фоторезиста (1 мкм), выступающего в роли искусственного диэлектрического слоя при переключении в пространстве между электродами. Такое соответствие подтверждает правильность проведенного расчета.

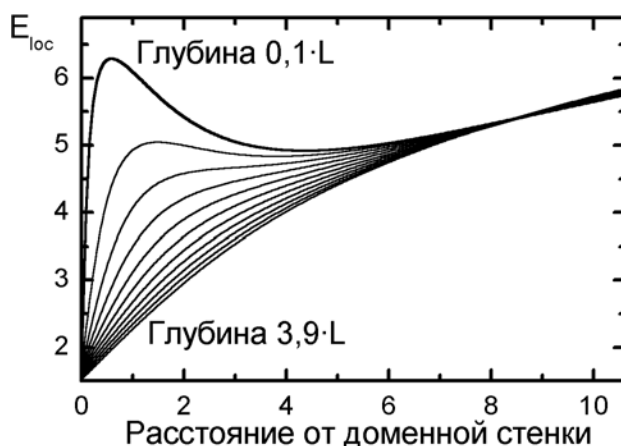


Рис. 14. Особенности распределения локального поля вблизи плоской доменной стенки. Расстояние от доменной стенки приведено в единицах толщины поверхностного диэлектрического зазора L .

Таким образом, несмотря на прикладной характер задачи о переключении с ППЭ, полученные результаты имеют существенное значение для понимания кинетики ДС. Удалось получить интересные сведения об экранировании деполяризующих полей, измерить полевую зависимость скорости бокового движения доменной стенки и обнаружить эффект коррелированного зародышеобразования. Вместе с тем, был получен также ряд результатов, важных и с точки зрения применения. Эффект умножения пространственной частоты ДС при обратном переключении может быть использован при создании ПДС с малым периодом.

Пятая глава посвящена изучению особенностей проявления эффекта коррелированного зародышеобразования при переключении с искусственным диэлектрическим слоем. Этот эффект приводил к формированию упорядоченных квазипериодических ДС в различных экспериментальных ситуациях.

При самопроизвольном обратном переключении в области за пределами электродов под слоем диэлектрика (фоторезиста) в процессе создания ПДС в CLN в некоторых случаях вместо движения доменных стенок при обратном переключении происходило формирование достаточно сложной квазипериодической ДС. Эта структура состоит из ориентированных рядов нанодоменов с размерами отдельных доменов порядка 30-100 нм и линейной плотностью в ряду порядка 10^4 мм^{-1} (Рис. 15). Наблюдалось две различные ориентации рядов: вдоль y^- направлений (под углом 60 градусов по отношению к электродам, Рис. 15а) и вдоль x^+ и x^- направлений (под углами 30 и 90 градусов, Рис. 15б).

Образование дендритных ДС наблюдалось при самопроизвольном обратном переключении в LN:Mg (Рис. 16,17) в областях, покрытых слоем диэлектрика. Как и в предыдущем случае, здесь наблюдался ориентированный рост рядов нанодоменов, распространяющихся от границы переключенной области (Рис. 16а,17). Однако, если этот рост сопровождался значительным удалением от границы, то ориентация отдельных ветвей становилась более произвольной, что приводило к формированию сложной дендритной структуры (Рис. 16б). Исследования в PRIM моде SPM показали, что дендритные ДС локализованы вблизи поверхности (Рис. 17б).

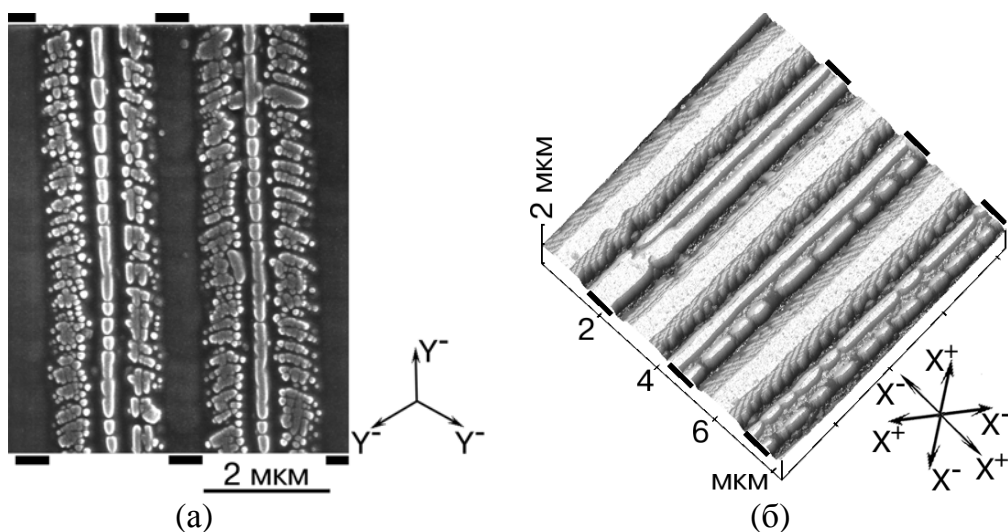
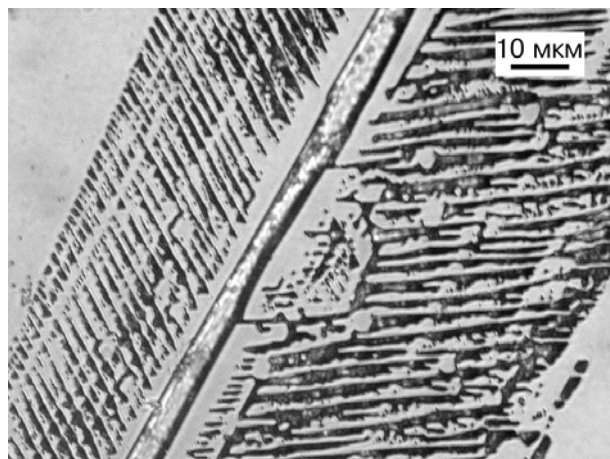
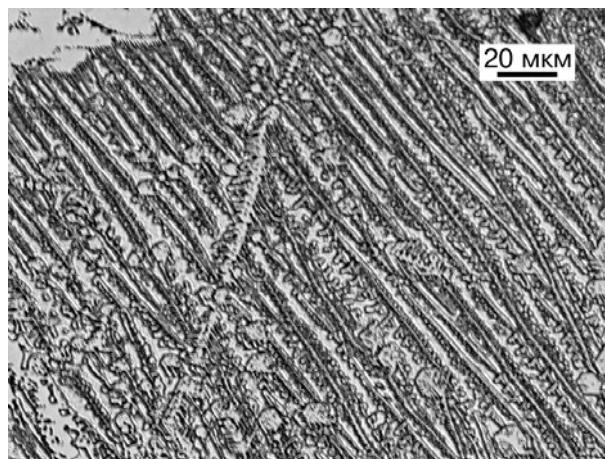


Рис. 15. Образование ориентированных вдоль (а) y^- и (б) x направлений рядов нанодоменов при самопроизвольном обратном переключении в CLN с ППЭ. Визуализация рельефа травления с помощью (а) SEM и (б) AFM.

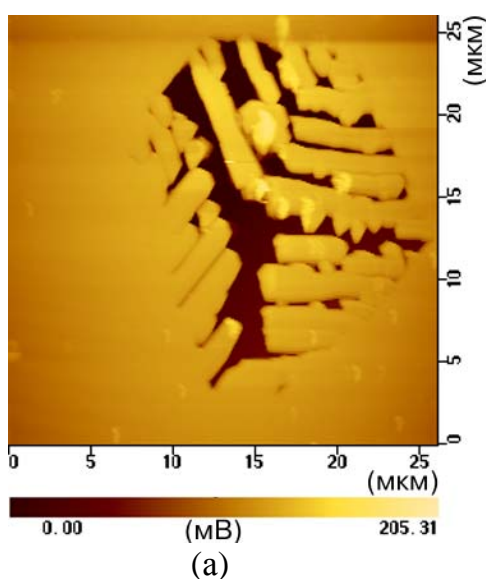


(a)

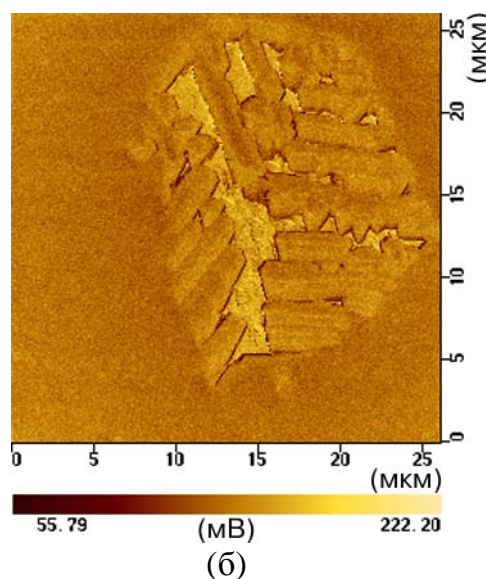


(б)

Рис. 16. Дендритные ДС в LN:Mg, образовавшиеся в результате самопроизвольного обратного переключения под диэлектрическим слоем. Жидкий электрод. Оптическая визуализация рельефа травления.

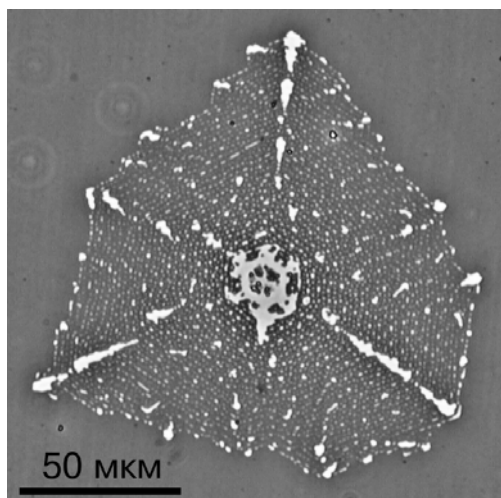


(a)

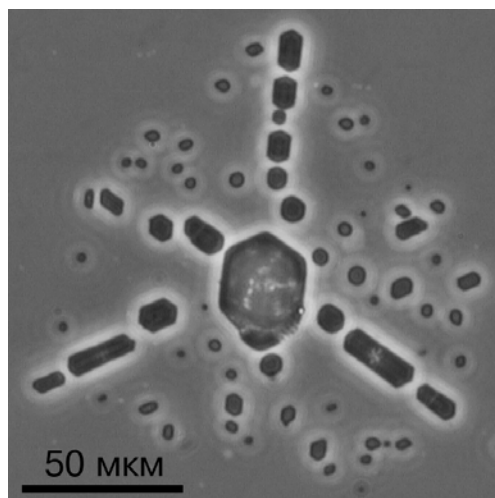


(б)

Рис. 17. Визуализация дендритной ДС в LN:Mg с помощью SPM: (a) AFM, (б) PRIM.



(a)



(б)

Рис. 18. Структуры микродоменов в SLT с искусственным диэлектрическим слоем, полученные в результате прямого переключения: (a) z^+ и (б) z^- поверхности. Оптическая визуализация рельефа травления.

Самоорганизованное формирование микродоменных структур в форме паутины наблюдалось при прямом переключении в образцах SLT вблизи точечных нарушений искусственного диэлектрического слоя (фоторезиста) (Рис. 18). В отличие от предыдущих случаев, структура начинала расти не от границы переключенной области, а из точечного центра, что приводило к формированию более правильной, с точки зрения симметрии, доменной конфигурации. Среднее расстояние между изолированными доменами в этой структуре порядка 2 мкм соответствует толщине диэлектрического слоя, что подтверждает ведущую роль механизма коррелированного зародышеобразования в формировании структуры. Было обнаружено, что такая ДС образуется только на z^+ поверхности, покрытой слоем диэлектрика. Сквозные домены, проросшие до z^- поверхности, продолжают расти в боковом направлении в виде правильных шестиугольников, что, объясняется различными условиями внешнего экранирования и отсутствием на z^- диэлектрического слоя. Таким образом, можно сделать вывод о том, что формирование таких структур обусловлено не только существованием максимума переключающего поля вблизи доменных стенок (Рис. 14), но также и подавлением эффектов внешнего экранирования деполяризующего поля, препятствующего росту изолированных доменов. Кроме того, необходимо отметить, что большую роль в формировании упорядоченных квазипериодических структур играет анизотропия эффекта коррелированного зародышеобразования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

В результате комплексного исследования (с использованием локальных и интегральных методов) эволюции доменной структуры в электрическом поле в конгруэнтных, стехиометрических и легированных монокристаллах ниобата лития и танталата лития были получены следующие основные результаты:

1. Совокупность полученных экспериментальных результатов объяснена в рамках единого подхода, базирующегося на рассмотрении процесса переключения, как фазового перехода первого рода. При этом рост доменов с выгодным направлением поляризации происходит за счет термостимулированного зародышеобразования, вероятность которого определяется величиной локального электрического поля.
2. Расчет особенностей пространственного распределения локального поля позволил объяснить замедление бокового движения доменных стенок перед коалесценцией, эффект коррелированного зародышеобразования и кинетику доменной структуры при самопроизвольном обратном переключении.
3. Аномальная кинетика доменной структуры в конгруэнтном танталате лития (большая плотность зародышей и треугольная форма доменов) может быть отнесена за счет чрезвычайно медленного объемного экранирования. Это приводит к замедлению роста изолированных доменов и определяющей роли коалесценции.
4. Увеличение плотности зародышеобразования при циклическом переключении в ниобате лития, легированном магнием, и после рентгеновского облучения в стехиометрическом танталате лития обусловлено существованием микровключений неполярной фазы.

5. Показано, что скорость бокового движения доменных стенок лимитируется генерацией микроступеней на стенках. Полевая зависимость скорости измерена прямыми методами для переключения со сплошными электродами и из анализа тока переключения при переключении с полосовыми периодическими электродами. Определена скорость прямого прорастания доменов.
6. Детально исследован эффект самопроизвольного обратного переключения под действием внутреннего поля смещения. С помощью оригинальной методики измерено изменение этого поля.
7. Впервые обнаружен эффект умножения пространственной частоты доменной структуры по сравнению с пространственной частотой электродов при самопроизвольном обратном переключении. Впервые при прямом и обратном переключении обнаружено самоорганизованное формирование квазипериодических микро- и нанодоменных структур, период которых определяется толщиной поверхностного диэлектрического слоя.
8. Разработанные методы контроля и управления доменной структурой могут быть использованы при создании периодических доменных структур для устройств акустоэлектроники и нелинейной оптики.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. V. Ya. Shur, A. L. Gruverman, and E. L. Rumyantsev, Dynamics of domain structure in uniaxial ferroelectrics, *Ferroelectrics*, 1990, V. 111, p. 123-131.
2. Ю. С. Кузьминов, Электрооптический и нелинейнооптический кристалл ниобата лития, Москва, изд. Наука, 1987, 264 с.
3. А. В. Голенищев-Кутузов, В. А. Голенищев-Кутузов, Р. И. Калимуллин, Индуцированные домены и периодические доменные структуры в электро- и магнитоупорядоченных веществах, *УФН*, 2000, Т. 170, вып. 7, с. 697-712.
4. R. L. Byer, Quasi-phasematched nonlinear interactions and devices, *J. Nonlinear Optical Physics & Materials*, 1997, V. 6, N. 4, pp. 549-592.
5. G. Rosenman, A. Skliar, and A. Arie, Ferroelectric domain engineering for quasi-phase-matched nonlinear optical devices, *Ferroelectrics Review*, 1999, V. 1, p. 263-326.
6. K. Kitamura, Y. Furukawa, K. Niwa, V. Gopalan, and T. Mitchell, Crystal growth and low coercive field 180° domain switching characteristics of stoichiometric LiTaO₃, *Appl. Phys. Lett.*, 1998, V. 73, N. 21, p. 3073-3075.
7. М. Лайнс, А. Гласс, Сегнетоэлектрики и родственные им материалы, М.: Мир, 1981, 736 с.
8. A. Gruverman, O. Auciello, and H. Tokumoto, Nanoscale investigation of fatigue effects in Pb(Zr,Ti)O₃ films, *Appl. Phys. Lett.*, 1996, V. 69, p. 3191-3193.
9. V. Ya. Shur, in *Ferroelectric thin films: synthesis and basic properties*, (Gordon&Breach, NY 1996) V. 10, Ch. 6, p. 193.
10. L. E. Myers, Quasi-phasematched optical parametric oscillators in bulk periodically poled lithium niobate, PhD thesis, Stanford University, 1995, 129 p.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. В. Шур, Н. Пономарев, Н. Тонкачева, С. Макаров, Е. Николаева, Е. Шишкин, Л. Суслов, Н. Салашченко, Е. Клюенков, Явление усталости в эпитаксиальных пленках цирконата-титаната свинца, ФТТ, 1997, Т. 39, вып. 4, с. 694-696.
2. V. Ya. Shur, S. Makarov, N. Ponomarev, I. Sorkin, E. Nikolaeva, E. I. Shishkin, L. Suslov, N. Salashchenko, and E. Kluev, Fatigue in the epitaxial films of lead zirconate-titanate, J. Korean Phys. Soc., 1998, V. 32, pp. S1714-S1717.
3. V. Ya. Shur, E. V. Nikolaeva, E. L. Rumyantsev, E. I. Shishkin, A. L. Subbotin, and V. L. Kozhevnikov, Smooth and jump-like dynamics of the plane domain wall in gadolinium molybdate, Ferroelectrics, 1999, V. 222, pp. 323-331.
4. V. Ya. Shur, E. L. Rumyantsev, S. D. Makarov, V. Kozhevnikov, E. V. Nikolaeva, and E. I. Shishkin, How to learn the domain kinetics from the switching current data, Integrated Ferroelectrics, 1999, V. 27, pp. 179-194.
5. V. Ya. Shur, E. L. Rumyantsev, E. V. Nikolaeva, E. I. Shishkin, D. V. Fursov, R. Batchko, L. Eyres, M. Fejer, and R. Byer, Nanoscale backswitched domain patterning in lithium niobate, Appl. Phys. Lett., 2000, V. 76, N. 2, pp. 143-145.
6. V. Ya. Shur, E. Rumyantsev, E. Nikolaeva, E. I. Shishkin, R. Batchko, G. Miller, M. Fejer, and R. Byer, Regular ferroelectric domain array in lithium niobate crystals for nonlinear optic applications, Ferroelectrics, 2000, V. 236, pp. 129-144.
7. V. Ya. Shur, E. L. Rumyantsev, E. V. Nikolaeva, E. I. Shishkin, R. Batchko, G. Miller, M. Fejer, and R. Byer, Micro- and nanoscale domain engineering in lithium niobate and lithium tantalate, SPIE Proc. on Smart Structures and Materials, 2000, V. 3992, pp. 143-154.
8. V. Ya. Shur, E. L. Rumyantsev, E. V. Nikolaeva, and E. I. Shishkin, Formation and evolution of charged domain walls in congruent lithium niobate, Appl. Phys. Lett., 2000, V. 77, N. 22, pp. 3636-3638.
9. V. Ya. Shur, E. L. Rumyantsev, E. V. Nikolaeva, E. I. Shishkin, D. V. Fursov, R. Batchko, L. Eyres, M. Fejer, R. Byer, and J. Sindel, Formation of self-organized nanoscale domain patterns during spontaneous backswitching in lithium niobate, Ferroelectrics, 2001, V. 253, pp. 105-114.
10. В. Я. Шур, В. Л. Кожевников, Д. В. Пелегов, Е. В. Николаева, Е. И. Шишкин, Скачки Баркгаузена при движении одиночной сегнетоэлектрической доменной стенки, ФТТ, 2001, Т. 43, вып. 6, с. 1089-1092.
11. V. Ya. Shur, E. V. Nikolaeva, E. I. Shishkin, I. S. Baturin, D. Bolten, O. Lohse, and R. Waser, Fatigue in PZT thin films, MRS Sym. Proc., 2001, V. 655, pp. CC10.8.1-CC10.8.6.
12. V. Ya. Shur, E. L. Rumyantsev, E. V. Nikolaeva, E. I. Shishkin, and I. S. Baturin, Kinetic approach to fatigue phenomenon in ferroelectrics, J. Appl. Phys., 2001, V. 90, N. 12, pp. 6312-6315.
13. V. Ya. Shur, E. L. Rumyantsev, E. V. Nikolaeva, E. I. Shishkin, I. S. Baturin, M. Ozgul, and C. Randall, Kinetics of fatigue effect, Integrated Ferroelectrics, 2001, V. 33, pp. 117-132.
14. V. Ya. Shur, E. L. Rumyantsev, E. V. Nikolaeva, E. I. Shishkin, R. Batchko, M. Fejer, and R. Byer, Recent achievements in domain engineering in lithium niobate and lithium tantalate, Ferroelectrics, 2001, V. 257, pp. 191-202.

15. V. Ya. Shur, E. V. Nikolaeva, E. I. Shishkin, V. L. Kozhevnikov, A. P. Chernykh, K. Terabe, and K. Kitamura, Polarization reversal in congruent and stoichiometric lithium tantalate, *Appl. Phys. Lett.*, 2001, V. 79, N. 19, pp. 3146-3148.
16. V. Ya. Shur, E. B. Blankova, E. L. Rumyantsev, E. V. Nikolaeva, E. I. Shishkin, A. V. Barannikov, R. Route, M. Fejer, and R. Byer, X-ray-induced phase transformation in congruent and vapor-transport-equilibrated lithium tantalate and lithium niobate, *Appl. Phys. Lett.*, 2002, V. 80, N. 6, pp. 1037-1039.
17. V. Ya. Shur, E. V. Nikolaeva, E. I. Shishkin, A. P. Chernykh, K. Terabe, K. Kitamura, H. Ito, and K. Nakamura, Domain shape in congruent and stoichiometric lithium tantalite, *Ferroelectrics*, 2002, V. 269, pp. 195-200.
18. V. Ya. Shur, E. L. Rumyantsev, E. I. Shishkin, E. V. Nikolaeva, R. Batchko, M. Fejer, R. Byer, and I. Mnushkina, Domain kinetics in congruent and stoichiometric lithium niobate, *Ferroelectrics*, 2002, V. 269, pp. 189-194.
19. V. Ya. Shur, E. L. Rumyantsev, D. V. Pelegov, V. L. Kozhevnikov, E. V. Nikolaeva, E. I. Shishkin, A. P. Chernykh, and R. Ivanov, Barkhausen jumps during domain wall motion in ferroelectrics, *Ferroelectrics*, 2002, V. 269, pp. 347-353.
20. В. Я. Шур, Е. Л. Румянцев, Е. В. Николаева, Е. И. Шишкин, И. С. Батулин, Кинетический подход к объяснению эффекта усталости в сегнетоэлектриках, *ФТТ*, 2002, Т. 44, вып. 11, с. 2049-2055.
21. В. Я. Шур, Е. В. Николаева, Е. И. Шишкин, В. Л. Кожевников, А. П. Черных, Кинетика доменной структуры и токи переключения в монокристаллах конгруэнтного и стехиометрического танталата лития, *ФТТ*, 2002, Т. 44, вып. 11, с. 2055-2061.

Отпечатано на принтере
в лаборатории сегнетоэлектриков НИИ ФПМ при УрГУ
Подписано к печати 02.09.2002, Формат 60x84 1/16,
Усл. печ. л. 1, Тираж 100 экз.

